

Halbleiter-Heterostrukturen in starken Magnetfeldern Erste Anfänge in Braunschweig und neuere Ergebnisse aus Würzburg

Landwehr, Gottfried

Veröffentlicht in:
Jahrbuch 2005 der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.133-150



J. Cramer Verlag, Braunschweig

Halbleiter-Heterostrukturen in starken Magnetfeldern Erste Anfänge in Braunschweig und neuere Ergebnisse aus Würzburg*

GOTTFRIED LANDWEHR

Physikalisches Institut der Universität Würzburg
Am Hubland, D-97074 Würzburg

Einleitung

Die systematische Erforschung der Halbleiter setzte nach dem 2. Weltkrieg ein. In den 30er Jahren wurde zwar auch Halbleiterforschung betrieben, die jedoch keinen sehr guten Ruf genoss. Sie wurde manchmal als die Physik der Dreckeffekte bezeichnet. Mangelnde Reinheit führte zu widersprüchlichen Resultaten. Dies änderte sich jedoch nach dem Kriege, nachdem man gelernt hatte, die Halbleiter Germanium und Silizium in sehr reiner Form darzustellen. Es war gelungen, aus diesen Materialien leistungsfähige Detektoren für die Radartechnik herzustellen. Über die elektronische Struktur von Germanium und Silizium war 1945 nur wenig bekannt. Weil das Potential dieser Halbleiter für die Herstellung von Bauelementen für die Hochfrequenztechnik erkennbar war, setzte eine intensive Erforschung in Industrielaboratorien und auch an Universitäten ein. Wegen der Bedeutung dieser Stoffklasse wurde an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig ein Laboratorium eingerichtet, dass sich mit der Erforschung von Halbleitereigenschaften befasste.

Die University of Illinois war nach dem Kriege ein Zentrum der Halbleiterforschung. Dort war der Miterfinder des Transistors und Nobelpreisträger John Bardeen tätig. Das Hauptarbeitsgebiet des Halbleiterlaboratoriums in Urbana-Champaign war die Erforschung der Germaniumoberfläche. Im Jahre 1959 wurde ich von der PTB beurlaubt, um an der University of Illinois zu arbeiten. Die Oberflächenforschung erwies sich jedoch als schwierig und zeitaufwändig, weil

* Vortrag gehalten beim Kolloquium anlässlich der Jahresversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft am 27. Mai 2005.

die Ultrahochvakuumtechnik noch in den Kinderschuhen steckte. Aus diesem Grund habe ich damals die Erforschung einer inneren Oberfläche, der Korngrenze in einem Germanium Bikristall aufgenommen. Man wusste bereits, dass an der Germanium Oberfläche Verarmungsrandschichten auftreten können, die zu einer Inversionsschicht führen kann. In einem n-leitenden Germaniumkristall kann durch Oberflächenbelegung oder durch Anwendung eines elektrischen Feldes eine p-leitende dünne Randschicht erzeugt werden. 1956 hatte Robert Schrieffer, der später den Nobelpreis (zusammen mit John Bardeen und Leon Cooper) für die Theorie der Supraleitung erhielt, sich mit der elektronischen Struktur der Germaniumoberfläche befasst. Er war zu dem Schluss gekommen, dass bei hinreichend starker Inversion die p-leitende Schicht so dünn sein sollte, dass Quanteneffekte zu erwarten waren. Diese sollten auftreten, wenn die de Broglie Wellenlänge der freien Ladungsträger größer ist, als die Dicke des Potentialtopfes. Voraussetzung für die Ausbildung der Quanteneffekte ist eine hohe Beweglichkeit der Ladungsträger in der dünnen Oberflächenschicht. Schrieffer ging jedoch davon aus, dass die Streuung der Löcher an der Germaniumoberfläche so stark war, dass die gebundenen Quantenzustände sich nicht ausbilden konnten. Weil die Ladungsträger ein zwei dimensionales Elektronengas bilden, das sich parallel zur Oberfläche ziemlich ungehindert ausbreiten kann, spricht man von elektrischen Subbändern.

Erste Experimente mit Germanium-Bikristallen

Bikristalle lassen sich gezielt durch Ziehen aus der Schmelze herstellen, wenn man zwei Keime gegeneinander verkippt. Das führt zu Fehlordnungen an der entstandenen Korngrenze und zur Bildung von unabgesättigten chemischen Bindungen, die Akzeptorcharakter haben. Bei Bikristallen mit einem Verkippfungswinkel $> 10^\circ$ entsteht eine p-leitende Schicht, die man unabhängig vom n-leitenden Kristalläußeren untersuchen kann. In Figur 1 ist das Schema eines Bikristalls skizziert sowie eine Probe zum Studium galvanomagnetischer Eigenschaften, d.h. Messung des Widerstands in einem äußeren Magnetfeld. Dies ist möglich, wenn Indiumkontakte verwendet werden, die einen Ohm'schen Kontakt zur p-leitenden Inversionsschicht und einen gleichrichtenden zum Kristalläußeren vom n-Typ bilden. Bei den Untersuchungen zeigte sich, dass die Leitfähigkeit der Korngrenzzone bei Temperaturen von 2 bis 250 K sich wie die von stark dotiertem Germanium verhielt. Messungen der Änderung des elektrischen Widerstandes im Magnetfeld ergaben jedoch, dass der Widerstandsanstieg bei tiefen Temperaturen bis zu 2 Zehnerpotenzen höher war als auf Grund der Leitfähigkeitsdaten zu erwarten war. Die Magnetowiderstandsänderung hing nicht nur von der Temperatur sondern auch von der Stärke des Magnetfeldes ab. Die Messresultate waren Anfang der 60er Jahre noch nicht verständlich, sie mussten als anomal klassifiziert werden [1]. Erst etwa 20 Jahre

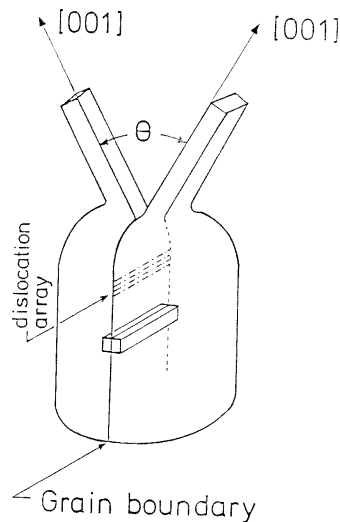


Abb. 1: Eine Korngrenze in einem Germanium Bikristall mit $\theta > 10^\circ$ verhält sich wie ein 2 dimensionales elektronisches System von p-Typ, wenn die Leitfähigkeit im Volumen unterdrückt wird.

später wurde die Theorie für den Transport in 2-dimensionalen fehlgeordneten Systemen entwickelt [2]. Auf Grund von Quanteneffekten tritt eine anomale Magnetowiderstandsänderung auf, die auf Interferenzerscheinungen zurückzuführen ist. Auch die Änderung der elektrischen Leitfähigkeit bei sehr tiefen Temperaturen unterhalb von 1 K kann derzeit theoretisch gedeutet werden. Zur Messung dieser Effekte ist allerdings die Beherrschung von Temperaturen im Millikelvinbereich erforderlich, die in den 60er Jahren noch nicht weit verbreitet war.

Die elektronische Bandstruktur an der Korngrenze eines Germanium Bikristalls wurde in den 80er Jahren in Würzburg theoretisch berechnet [3], die Resultate sind in Figur 2 wiedergegeben. Das Potential ist symmetrisch, es sind 2 elektrische Subbänder erkennbar, die den schweren und leichten Löchern zuzuordnen sind. Erste Versuche in Illinois zum Nachweis der elektrischen Subbänder waren nicht erfolgreich, es stand lediglich ein Elektromagnet mit einer maximalen Feldstärke von 12000 Gauss (oder 1,2 T) zur Verfügung. Erst sehr viel stärkere Magnetfelder führten etwa 20 Jahre später zum Nachweis der elektrischen Quantisierung [4]. Die in Abbildung 3 gezeigten Kurven eines durch Quanteneffekte bedingten oszillatorischen Widerstandes eines Germanium Bikristalls im Magnetfeld wurden am Hochfeldmagnetlaboratorium Grenoble in Magnetfeldern bis zu 25 T erzielt.

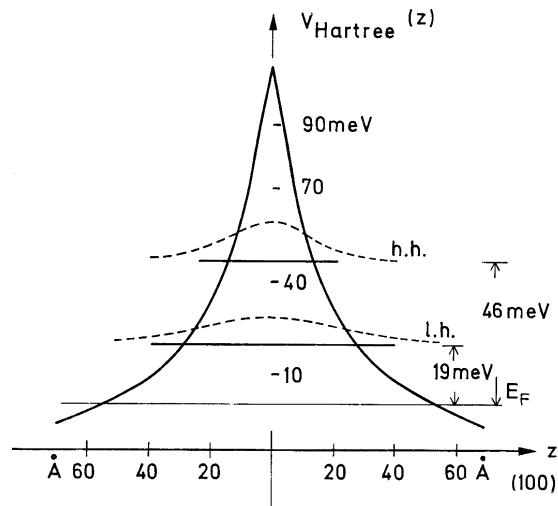


Abb. 2: Berechnung von el. Subbändern für einen Ge-Bikristall durch selbstkonsistente Lösung von Schrödinger- und Poisson-Gleichung mittels der $k \cdot p$ Methode (E. Bangert, Würzburg, ref. [3]).
 hh=Subband von schweren Löchern; lh=Subband von leichten Löchern; E_F =Fermi Energie.

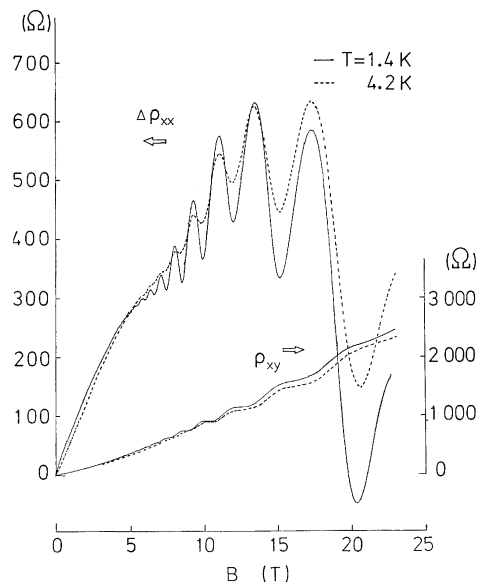


Abb. 3: Magnetowiderstand und Hall-Widerstand für einen Ge-Bikristall mit $\theta=15^\circ$ (ref. [4]).

Erste Messungen des Magnetowiderstandes in starken Magnetfeldern in Braunschweig

Seit 1946 hatte Eduard Justi den Lehrstuhl für Technische Physik an der TH Braunschweig inne. In den 30er Jahren war er Leiter des Kältelaboratoriums der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (PTR) in Berlin. Das Kältelaboratorium verfügte über flüssiges Helium und einen starken Elektromagneten. An der PTR hatte Justi mit seinen Mitarbeitern den Magnetowiderstand von reinen Metalleinkristallen bei tiefen Temperaturen studiert und insbesondere die Anisotropie. Diese Richtungsabhängigkeit war sehr ausgeprägt und zur damaligen Zeit nicht verständlich. Die Bändertheorie der festen Körper existierte bereits, es konnten jedoch nur qualitative Schlussfolgerungen gezogen werden, weil detaillierte Berechnungen der Bandstruktur unter Berücksichtigung des Kristallgitters noch nicht vorlagen. Die in Berlin erzielten Resultate konnten erst nach dem zweiten Weltkrieg interpretiert werden.

An der Berliner Universität war in den 30er Jahren der Theoretiker Max Kohler als Dozent tätig. Er hatte bei Max von Laue über Relativitätstheorie promoviert. Darüber hinaus interessierte er sich für Festkörperphysik und insbesondere für Transporteffekte, die durch starke Magnetfelder hervorgerufen werden. Es kam zu einer Zusammenarbeit zwischen Justi und Kohler, die auch im Krieg fortgeführt wurde. Die von Justi und Mitarbeitern noch an der Reichsanstalt erzielten Resultate führten zur Formulierung der sogenannten Kohler'schen Regel die besagt, dass die Änderung des elektrischen Widerstandes im Magnetfeld vom Verhältnis von Magnetfeld zu Widerstand im Feld Null abhängt. Eduard Justi hat auch nach seiner Berufung nach Braunschweig im Jahre 1946 sein Interesse an Transportmessungen in starken Magnetfeldern beibehalten.

Am Institut für Technische Physik wurden neben Leitfähigkeitsmessungen mit und ohne Magnetfeld auch die Thermoelektrizität und die Photovoltaik erforscht. Eine Arbeitsgruppe befasste sich mit Brennstoffzellen. Eduard Justi hatte die Bedeutung der Energiedirektumwandlung frühzeitig erkannt, er war offenbar seiner Zeit ziemlich weit voraus.

Im Justi'schen Institut wurde in den 60er Jahren eine von Max Kohler angeregte Arbeit zur Magnetowiderstandsänderung von Kalium bei tiefen Temperaturen durchgeführt. Dazu wurde eine Apparatur zur Erzeugung von gepulsten Magnetfeldern bis 10 T gebaut [5]. Mit dieser Apparatur wurden die ersten oszillatorischen Effekte in der Magnetowiderstandsänderung des Halbleiters Wismut-Tellurid gemessen [6]. Eine spätere Messung ist in Figur 4 wiedergegeben.

Messung der oszillatorischen Magnetowiderstandsänderung von Halbleitern (Shubnikov deHaas Effekt)

Bringt man einen Halbleiter mit hoher Ladungsträgerbeweglichkeit in ein starkes Magnetfeld, erfolgt eine Quantisierung der Ladungsträgerenergie auf Grund

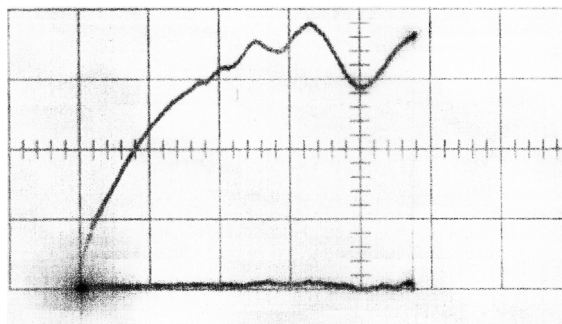


Abb. 4: Shubnikov – de Haas Oszillationen eines Bi_2Te_3 - Einkristalls gemessen mit einem gepulsten Magnetfeld bis 100 kG bei 4.2K (Nach P. Drath, ref. [6]).

einer periodischen Bewegung der Elektronen (oder Löcher) um die Richtung des Magnetfeldes. Dies wurde Anfang der 30er Jahre von L. Landau theoretisch berechnet. Dazu müssen die Magnetfelder so stark sein, dass ein Ladungsträger mindestens einen Umlauf um die Richtung des Magnetfeldes ausgeführt hat, ehe er gestreut wird. Die Erfüllung dieser Bedingung setzt auch tiefe Temperaturen voraus. Voraussetzung ist weiterhin, dass der Halbleiter sich quasi metallisch verhält, d.h. die Fermienergie muss im Band liegen. Der elektrische Widerstand zeigt als Funktion eines Magnetfeldes typische Oszillationen, deren Amplitude mit dem Magnetfeld zunimmt, die zuerst von L. Shubnikov an Wismut beobachtet wurden. Eine Analyse der Richtungsabhängigkeit der Shubnikov deHaas Oszillationen erlaubt eine Bestimmung der elektronischen Bandstruktur. Nach dem erfolgreichen Experiment [5] am Institut für Technische Physik wurde auch an der PTB eine Pulsapparatur gebaut, welche die Erzeugung von Feldern bis zu 25 T bei einer Pulslänge von einigen Millisekunden erlaubte. Mit dieser Apparatur wurde auch der Magnetowiderstand von Korngrenzen in Germanium Bikristallen bei hohen Magnetfeldern gemessen, allerdings ohne den Nachweis von Quantenoszillationen. Der spätere Erfolg von Messungen in Grenoble ist auf die höhere Qualität der verwendeten Germanium Bikristalle zurückzuführen. Weiterhin wurde der Shubnikov deHaas Effekt von Tellur studiert [7] sowie die Magnetowiderstandsänderung an Indium Antimonid in der Quantengrenze, wenn nur das unterste Landau Niveau besetzt ist [8].

Beginn der Erforschung 2-dimensionaler Systeme in Würzburg

Die Dissertation von Klaus von Klitzing, der 1969 als Doktorand nach Würzburg kam, betraf die Magnetowiderstandsänderung von Tellur-Einkristallen in der Quantengrenze. Im Laufe dieser Untersuchungen zeigten sich unerwartete

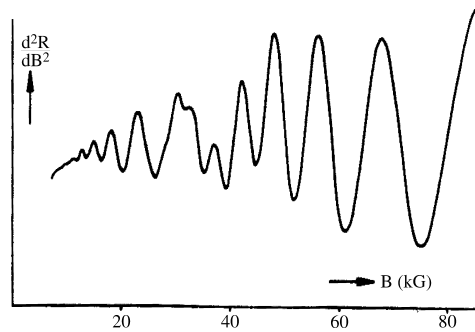


Abb. 5: Zweite Ableitung des el. Widerstands eines Te-Kristalls geringer Dotierung mit einer Anreicherungsschicht auf der Oberfläche. (Nach K. v. Klitzing, ref. [9]).

Shubnikov deHaas Oszillationen. Sie wurden hervorgerufen durch eine Anreicherungsrandsschicht an der Telluroberfläche. Die Effekte waren sehr klein und die in Abbildung 5 gezeigten Oszillationen waren nur in der 2. Ableitung des elektrischen Widerstandes nach dem Magnetfeld sichtbar [9]. Die Publikation dieser Resultate führte zu einer Zusammenarbeit mit Gerhard Dorda von den Siemens Forschungslaboratorien in München. Er hatte den Piezowiderstandseffekt von Silizium MOSFETs erforscht und gefunden, dass er wesentlich von den Resultaten in 3-dimensionalem Silizium abwich. Er war nach Würzburg gekommen um eine Kooperation bei der Untersuchung des Piezo-widerstandseffektes bei tiefen Temperaturen in starken Magnetfeldern zu eruieren.

Untersuchung an Silizium MOSFETs

Der MOSFET (Metal Oxide Silicon Field Effect Transistor) ist ein Bauelement, das Grundlage der modernen integrierten Schaltkreise ist. Transporteigenschaften im Magnetfeld von Silizium MOSFETs wurden zum ersten Mal Anfang der 60er Jahre bei den IBM Laboratorien in den USA erforscht [10]. Beim MOSFET wird durch einen Oberflächenkondensator zwischen „source and drain“ ein leitfähiger Kanal erzeugt, dessen Leitfähigkeit man durch die angelegte Gatespannung kontrollieren kann. Man kann sowohl n- als auch p-leitende Kanäle erzeugen. Die Ladungsträgerbeweglichkeit in n-Kanälen ist in der Regel so hoch, dass man bereits in Magnetfeldern von 10 T ausgeprägte Landauquantisierung erzielen kann und damit Shubnikov deHaas Oszillationen messen kann. Vor dem Besuch von Gerhard Dorda in Würzburg waren nur Quantenoszillationen an n-leitenden Kanälen nachgewiesen. Bei Diskussionen zeigte sich jedoch, dass in München p-Kanal MOSFETs verfügbar waren, bei denen die Löcherbeweglichkeit so hoch war, dass Quantenoszillationen nachweisbar sein sollten. Klaus

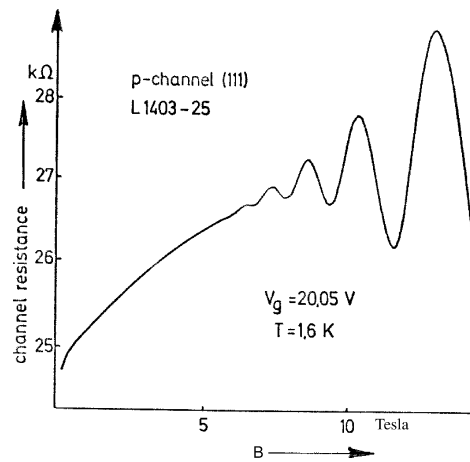


Abb. 6: Messungen an p-Kanal MOSFETs an der Hochfeld-Magnetanlage Braunschweig (K. v. Klitzing, 1974, ref. [12]).

von Klitzing gelang zum ersten Mal der Nachweis von solchen Oszillationen, zunächst in der Ableitung der Magnetowiderstandskurve, später auch im Widerstand [11]. Die am Würzburger Physikalischen Institut verfügbaren Magnetfelder, die mit Hilfe eines supraleitenden Magneten erzeugt wurden, waren auf 10 T beschränkt. Messungen in höheren Magnetfeldern waren jedoch zweckmäßig. Aus diesem Grund wurden 1974 Messungen an der Hochfeldmagnetanlage der TH Braunschweig durch Klaus von Klitzing ausgeführt. Ein Beispiel einer Registrierkurve ist in Abbildung 6 wiedergegeben [12]. Für die Interpretation der Messresultate war die Berechnung der elektrischen Subbänder von p-Kanal MOS-Strukturen erforderlich. Diese wurden in Würzburg von E. Bangert [13] ausgeführt und unabhängig davon von Ando und Uemura in Japan [14]. Es zeigte sich, dass die Bandstruktur von p-Kanal MOSFETs sich wesentlich von der Volumenbandstruktur unterschied.

Erzeugung starker Magnetfelder

Starke Magnetfelder sind seit langem ein wertvolles Hilfsmittel der Festkörperphysik. Stationäre Magnetfelder bis zur Stärke von 3000 Gauss (0,3 T) konnte man seit langem mit kleinen Elektromagneten erzeugen. Felder von 1 T wurden in der Vergangenheit (z.B. im Kältelaboratorium der PTR in Berlin) mit schweren Elektromagneten mit einer Leistung von ca. 100 kW hergestellt. Höhere stationäre Felder von etwa 10 T wurden zum ersten Mal am MIT in Boston in den 30er Jahren von Francis Bitter mit wassergekühlten Kupferspulen mit ei-

nem Energieaufwand von 2 Megawatt erzeugt. Weil Bedarf an höheren Feldstärken vorhanden war, wurden Mitte der 60er Jahre an verschiedenen Stellen der Welt Hochmagnetfeldlaboratorien etabliert, in denen mit einem Energieaufwand von 10 Megawatt Felder von maximal 20 T hergestellt werden konnten. Im Zuge dieser Entwicklungen wurde an der TH Braunschweig auf Grund der Initiative von Eduard Justi ein Hochfeldmagnetlaboratorium mit einer Energieversorgung von 5 Megawatt eingerichtet. Es wurde möglich, in Magneten mit einer Bohrung von 5 cm 15 T zu generieren und bei 3 cm Innendurchmesser 18 T. Diese Anlage wurde im Wesentlichen von der Volkswagen Stiftung finanziert. Die neuen Möglichkeiten wurden durch viele Gäste genutzt, auch von Klaus von Klitzing, dessen Experimente an p-Kanal MOSFETs bereits erwähnt wurden [12].

Bei der Erzeugung starker Magnetfelder hatte es in den 60er Jahren große Fortschritte gegeben, nachdem man gelernt hatte, supraleitende Materialien mit hoher Stromtragfähigkeit und kritischer Feldstärke herzustellen. Die supraleitenden Magneten wurden sehr rasch akzeptiert, weil sie relativ preisgünstig waren und weil Messungen in Feldern bis zu 10 T vor Ort möglich wurden. In der Zwischenzeit ist es möglich, supraleitende Magneten mit einer maximalen Feldstärke von 20 T herzustellen. Die Erforschung von optischen und Transporteigenschaften von Halbleitern nahm einen großen Aufschwung. Allerdings sind konventionell erzeugte Magnetfelder nach wie vor unentbehrlich, weil es möglich wurde, höhere Feldstärken bis zu 33 T mit einem Energieaufwand von 20 Megawatt zu erreichen. Die Kombination eines äußeren Supraleitungsmagneten und eines inneren wassergekühlten Magneten gestattet es, in den sogenannten Hybridmagneten Felder bis zu 45 T zu erzeugen. Vor kurzem hat eine von der American National Science Foundation eingesetzte Kommission eine Denkschrift vorgelegt, in der die Forschungsmöglichkeiten mit starken Magnetfeldern aufgezeigt werden. Eine Weiterentwicklung der Magnettechnologie wird nachdrücklich vorgeschlagen [15].

Am Physikalischen Institut der Universität Würzburg wurde 1976 ein Supraleitungsmagnet mit einer maximalen Feldstärke von 14,6 T angeschafft, der zu weiteren Experimenten an Silizium MOSFETs genutzt wurde, von denen im folgenden die Rede sein wird. In Figur 7 zeigt Klaus von Klitzing an diesem Magneten.

Experimente an n-Kanal MOSFETs

Mitte der 70er Jahre wurden die Untersuchungen an Feldeffekttransistoren auf Proben mit einem n-leitenden Kanal ausgedehnt. Die n-leitenden MOSFETs haben eine wesentlich höhere Trägerbeweglichkeit als diejenigen mit einer p-leitenden Oberflächenrandschicht. An Exemplaren mit getrennten Potential-



Abb. 7: K. v. Klitzing am Würzburger 14,6 Tesla Supraleitungsmagnet.

und Stromsonden die von den Siemens Laboratorien zur Verfügung gestellt wurden, wurden der Magnetowiderstand und der Hall-Effekt studiert. Weil es möglich ist, in einer Feldeffektanordnung die Elektronenkonzentration in einem weiten Bereich durch die Gate-Spannung zu variieren, ist es möglich, Quantenoszillationen in einem konstanten Magnetfeld als Funktion der Konzentration der Ladungsträger im Kanal zu studieren. Die ersten spektakulären Ergebnisse wurden 1977 erzielt und 1978 publiziert [16]. Im oberen Teil von Abbildung 8 sieht man strukturierte Maxima im elektrischen Widerstand als Funktion der Gatespannung. Zwischen den Maxima geht der Widerstand auf Null herunter. Die Maxima sind einzelnen Landauniveaus zuzuordnen und auf Grund des Elektronenspins aufgespalten. Eine weitere Aufspaltung zeigt sich auf Grund der speziellen Bandstruktur des Siliziums, die so genannte „Valley Aufspaltung“. Im Unterteil der Abbildung ist der Hall Widerstand aufgetragen. Dieser nimmt mit zunehmender Gatespannung auf Grund der zunehmenden Ladungsträgerkonzentration ab. Bei einer Gatespannung von 8 V tritt ein Plateau auf, das zunächst nicht gedeutet werden konnte. Im Jahr 1980 konnte Klaus von Klitzing bei Messungen im Hochmagnetfeldlaboratorium Grenoble nachweisen, dass die auftretenden Plateaus ganzzahligen Bruchteilen von h/e^2 zu-

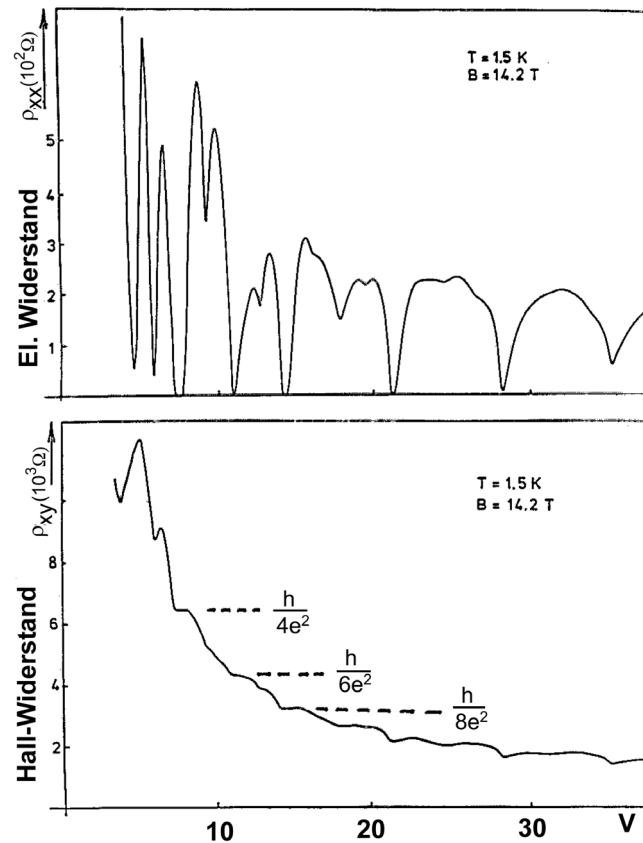


Abb. 8: Daten zum Längswiderstand ρ_{xx} und Hallwiderstand ρ_{xy} von n-Kanal MOSFETs präsentiert 1978 bei der Intern. Conf. EP2DS in Berchtesgaden. Die Beschriftungen der Quanten-Hall Niveaus fehlten in der ursprünglichen Veröffentlichung (ref. [16]).

geordnet sind [17]. Anschließende Messungen am Würzburger 14,6 T Magneten ergaben eine außerordentliche Präzision der Quantisierung des 4. Plateaus, Abweichungen von $h/4e^2$ waren kleiner als 5×10^{-6} . Dies ist der integrale Quanten Hall-Effekt, eine Entdeckung von fundamentaler Bedeutung, die 1985 mit der Verleihung des Nobelpreises an Klaus von Klitzing gewürdigt wurde. Die weitere Entwicklung ist bekannt und soll hier nicht weiter diskutiert werden. An GaAs/GaAlAs Quantentrogstrukturen mit extrem hoher Elektronenbeweglichkeit wurde der fraktionale Quanten Hall-Effekt entdeckt [18], der auf Vielteilcheneffekte zurückgeführt wird. 25 Jahre nach der Entdeckung werden mehr als 400 Arbeiten pro Jahr zum Quanten Hall-Effekt publiziert.

Halbleiter-Heterostrukturen

Silizium MOSFETs sind Heterostrukturen, im gegenwärtigen Sprachgebrauch bezeichnet man jedoch meistens solche Schichtenstrukturen als Heterostrukturen, bei denen Halbleiterschichten aus Materialien mit unterschiedlicher Bandlücke aufeinander folgen. Die Erzeugung von Schichtenstrukturen wurde in den 70er Jahren durch die Molekularstrahlepitaxie (MBE) möglich. Mit dieser Technik ist es möglich, dünne Schichten sukzessiv Atomlage für Atomlage kontrolliert zu erzeugen. Dies geschieht durch langsames Aufwachsen im Ultrahochvakuum. Auch andere Epitaxie Methoden wurden in die Halbleiterphysik eingeführt, die es ermöglichten, neue Bauelemente wie Heterobipolartransistoren zu realisieren. Das Heterostrukturprinzip erlaubte es auch, funktionsfähige Halbleiterlaser zu konzipieren und zu realisieren. Diese Entwicklung erwies sich als sehr bedeutsam. Für ihre Arbeiten über Halbleiterheterostrukturlaser wurde Herbert Kroemer und Zhores Alferov 2000 der Nobelpreis für Physik verliehen.

Mit Hilfe der Molekularstrahlepitaxie wurde es möglich, neuartige Strukturen mit maßgeschneiderter Bandstruktur herzustellen. Als besonders geeignet erwiesen sich die III-V Halbleiter GaAs und AlAs, die sich nur unwesentlich in der Gitterkonstante unterscheiden. Dadurch wird es möglich, defektarme Grenzflächen zu realisieren. Nach einem Vorschlag von Leo Esaki wurden Supergitter mit GaAs Potentialtrögen und GaAlAs Potentialbarrieren hergestellt. Als besonders interessant erwies sich auch das Studium von Einzelquantentrögen die es erlaubten, die durch Grenzflächenquantisierung entstandenen elektrischen Subbänder mit optischen Methoden zu studieren. Auch die Erforschung der Magnetotransporteigenschaften von 2-dimensionalen Strukturen auf der Basis von GaAs erwies sich als sehr erfolgreich. Bald nach der Entdeckung des Quanten Hall-Effektes an Si-MOSFETs gelang es den Effekt auch an GaAs Heterostrukturen nachzuweisen [19]. Die Entdeckung des fraktionalen Quanten Hall-Effektes im Jahr 1982 durch T.C. Tsui, H. Störmer und R. Laughlin wurde bereits erwähnt, sie wurde 1998 durch Verleihung des Nobelpreises für Physik gewürdigt.

Heterostrukturen aus II-VI-Halbleitern

Auch aus Verbindungshalbleitern, die aus Elementen der II. und VI. Hauptgruppe des Periodensystems zusammengesetzt sind, lassen sich mit Hilfe der MBE Heterostrukturen hoher Güte erzeugen. Im Folgenden soll kurz vom System HgTe/CdTe berichtet werden, das am Physikalischen Institut Würzburg in der letzten Dekade intensiv erforscht wurde. Da auch HgTe und CdTe sich nur wenig in der Gitterkonstante unterscheiden, ist es möglich, Quantentrogstrukturen hoher Qualität herzustellen. Das System ist deshalb von speziellem Interesse, weil HgTe ein Halbmetall ist, bei dem sich Leitungs- und Valenzband

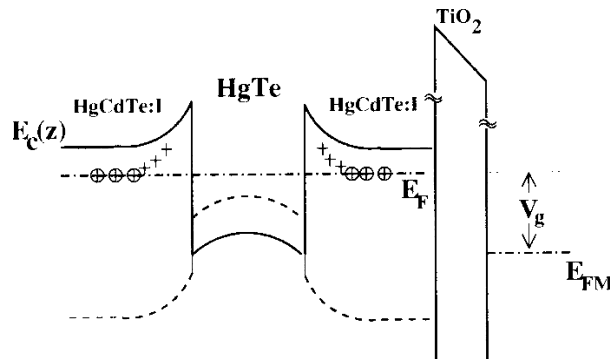


Abb. 9: Schema eines mit Jod modulationsdotierten HgTe/HgCdTe Quantentrogs mit einem seitlichen Gate mit TiO_2 Isolator. E_F = Fermi Energie. V_g = Gate Spannung. E_c = Energie des Leitungsbandes.

überlappen. Der Einschluss einer dünnen HgTe Schicht zwischen 2 Barrieren aus HgCdTe erlaubt es jedoch auf Grund der Ausbildung von elektrischen Subbändern die Überlappung von Valenz- und Leitungsband aufzuheben. Es entsteht ein Halbleiter mit kleiner Bandlücke der Größenordnung 10 meV. Weil das Halbmetall HgTe eine so genannte invertierte Bandstruktur aufweist, bei der das niedrigste Leitungsband und das den leichten Löchern zugeordnete Valenzband ihre Rollen vertauscht haben, weisen HgTe Quantentrogstrukturen besondere Eigenschaften auf [20]. Eine HgTe/HgCdTe Struktur mit einem einzelnen Quantentrog ist in Figur 9 schematisch dargestellt. Es lassen sich durch Modulationsdotierung Proben mit sehr hoher Elektronen- und Löcherbeweglichkeit herstellen. Bei Modulationsdotierung wird das Barrierenmaterial nahe an den Grenzflächen des Quantentrogs dotiert. Die Trennung der freien Ladungsträger im Trog von den ionisierten Dotieratomen in den Barrieren erlaubt eine hohe Elektronenbeweglichkeit von mehr als $10^5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Dadurch ist ein Studium des Shubnikov deHaas Effektes möglich. Das besondere an HgTe/HgCdTe Quantentrogstrukturen ist, dass bei asymmetrischer Modulationsdotierung auf Grund von Spin-Bahn-Wechselwirkung eine Spinaufspaltung der Energieniveaus auftritt. Durch ein externes elektrisches Feld, das durch eine seitliche Gate-Elektrode erzeugt wird, lässt sich die Spinaufspaltung steuern (Rashba Effekt). Dies ist von Interesse für das neue Arbeitsgebiet der Spintronik, das zum Ziel hat, Bauelemente zu realisieren, die nicht auf der Elektronenladung sondern auf dem Elektronenspin beruhen.

In Figur 10 sind Daten zum Shubnikov deHaas Effekt eines symmetrischen HgTe/HgCdTe Quantentrogs wiedergegeben, bei dem mit Hilfe einer Gateelektrode die Spinaufspaltung verändert wird [21]. Im linken Teil der Abbildung sind 5 Messkurven dargestellt, die bei unterschiedlichen Gatespannungen gewon-

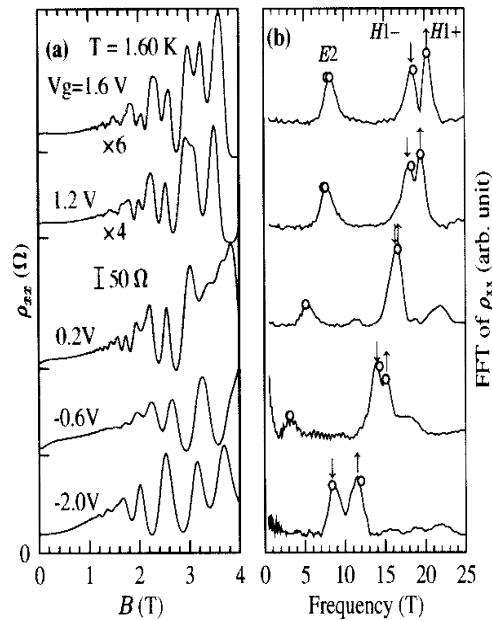


Abb. 10: Shubnikov deHaas Oszillationen eines symmetrischen HgTe/HgCdTe Quantentrogs mit einer Dicke von 21 nm für 5 verschiedene Gate Spannungen (links). Fourier Analyse der SdH Oszillationen bei den entsprechenden Gate-Spannungen (rechts). Die Spin-Aufspaltung des H_1 Bandes bei größeren positiven und negativen V_g -Werten ist deutlich zu erkennen. E_2 = oberes Leitungsband, H_1 = unterstes Leitungsband (ref. [21]).

nen wurden. Durch Fourieranalyse lassen sich 2 Leitungsbander, E_2 und H_1 identifizieren. Im rechten Teil von Abbildung 10 kann man bei positiven und negativen Gatespannungen eine Spinaufspaltung des untersten Leitungsbandes H_1 erkennen, die durch ein elektrisches Feld verursacht wird. Hinsichtlich Einzelheiten muss auf die Originalarbeit [21] verwiesen werden.

Die hohe Qualität der HgTe/HgCdTe Quantentrogstruktur ist an sehr gut ausgebildeten Quanten-Hall Plateaus zu erkennen. Der Hall-Widerstand für diverse Gatespannungen zwischen -2,4 und 1,6 V ist in Abbildung 11 wiedergegeben.

Schließlich soll noch eine Messung des Quanten-Hall Effektes wiedergegeben werden, bei dem das unterste Landau Niveau mit der Quantenzahl 1 bei magnetischen Feldstärken und $T = 1,2$ K zwischen 2 und 27 T besetzt ist und der Hall-Widerstand h/e^2 beträgt. Es handelt sich um eine niedrig dotierte HgTe Probe mit ca. 2 % Mn im Quantentrog. Auf Grund der (legierungsbedingten) Fehlordnung im Trog geht auch bei sehr hohen Magnetfeldern der Widerstand nicht in die Quantengrenze [22]. Eine genaue Analyse der Daten ist in Vorbereitung.

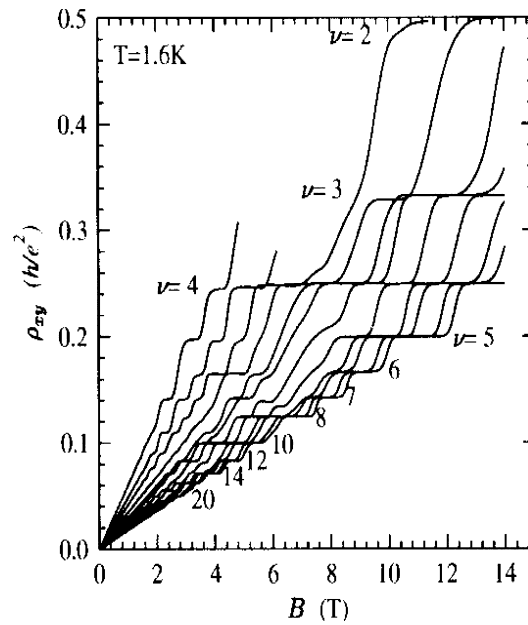


Abb 11: Quantum Hall Effekt derselben Probe bei diversen Gate-Spannungen
 ν = Besetzungszahlen der jeweiligen Landau-Niveaus (ref. [21]).

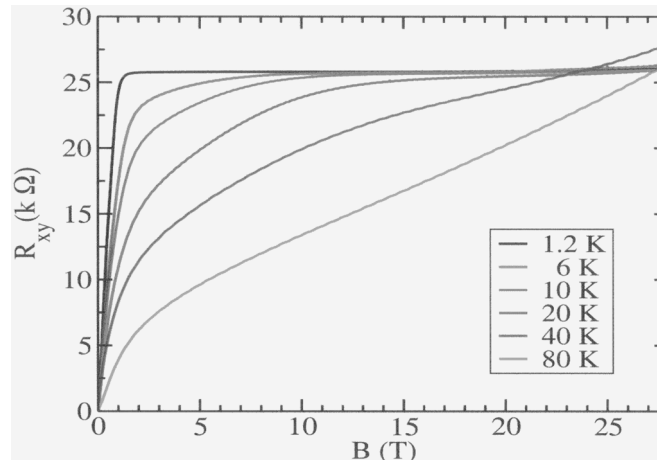


Abb. 12: Hall-Widerstand eines HgMnTe Quantentrogs bei Temperaturen zwischen 1,2 und 80 K und Magnetfeldern bis 27 T. Der QHE mit der Besetzungszahl $\nu = 1$ des untersten Landau Niveaus ist bei 1,2 K bereits ab 2 T ausgebildet (nach ref. [22]).

Schlussbemerkungen

Anlässlich des Gauss Jahres werden einige frühere Entwicklungen der Braunschweiger Physik aufgezeigt, die sich als wichtig erwiesen haben. Die Geschichte der Physik befasst sich vorwiegend mit länger zurückliegenden Zeitabschnitten. In der wissenschaftlichen Spezialliteratur sind historische Zusammenhänge häufig nur schwer zu erkennen. Beschränkungen des zur Verfügung stehenden Platzes bei Publikationen haben zur Folge, dass die Vorgeschichte häufig in Zitaten verborgen ist, die sich oft nur dem speziell Interessierten erschließen. Aus diesem Grund sind die Braunschweiger Entwicklungen, die auf der Anwendung starker Magnetfelder beruhen, etwas ausführlicher dargestellt.

Eines wird hoffentlich deutlich: Große wissenschaftliche Fortschritte erfordern eine lange Vorlaufzeit. Sie sind meistens aus Grundlagenforschung erwachsen, für die anfänglich keine Anwendungen zu erwarten waren. Ein gutes Beispiel dafür ist der Quanten Hall-Effekt. Die ersten Anfänge entstanden an der PTB und hatten mit deren erklärter Hauptaufgabe, der Entwicklung von Präzisionsmessmethoden und der Realisierung der physikalischen Grundeinheiten, zunächst wenig zu tun. Für die Unterstützung der Halbleiterforschung in starken Magnetfeldern durch das Direktorium der PTB war offenbar die Neuigkeit der Arbeiten und deren Niveau entscheidend. Niemand konnte erwarten, dass aus dem Shubnikov-de Haas Effekt einmal die von Klitzing Konstante und ein Widerstandsnormale bisher unerreichte Präzision entstehen würde (für Einzelheiten siehe ref. [23]). Es kann keinem Zweifel unterliegen, dass Karl Friedrich Gauss, der einen großen Teil seiner physikalischen Aktivitäten dem Magnetismus gewidmet hat, am Quanten Hall-Effekt seine Freude gehabt hätte.

Noch etwas dürfte klar geworden sein: Die geschilderten Arbeiten zum Magneto-Transport erforderten die Kombination von extremen Bedingungen, nämlich von tiefen Temperaturen im Bereich des flüssigen Heliums und Magnetfeldern, die mindestens Hunderttausend Mal stärker waren, als die seinerzeit von Gauss erforschten. Unabdingbar war auch die Verfügbarkeit von Halbleiterproben hoher Qualität, seien es Einkristalle oder Silizium Strukturen. Die Materialien stammten übrigens häufig aus Industrielaboratorien, die derzeit von Politikern angeordnete Kooperation zwischen Universitäten und Industrie wurde bereits vor 50 Jahren erfolgreich praktiziert. Es dürfte auch wohl klar geworden sein, dass Max Kohler und Eduard Justi für den Beginn der hier skizzierten Entwicklung eine fundamentale Rolle gespielt haben.

Der Beginn der Erforschung 2-dimensionaler elektronischer Systeme in den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts hatte Fortschritte bei der Herstellung dünner Schichten zur Voraussetzung, die ein Studium von Quanteneffekten erlauben. Es ist evident, dass Anwendungsaspekte bei der Entwicklung der Silizium-Technologie der Hauptimpetus waren. Aber auch die GaAs Technologie wurde vom Bedürfnis nach leistungsfähigeren Bauelementen vorangetrieben. Es ist

offensichtlich, dass die Grundlagenforschung von der Leistungsfähigkeit der Molekularstrahl-Epitaxie außerordentlich profitiert hat. Die Erforschung niederdimensionaler Strukturen wurde in der Halbleiterphysik immer wichtiger, der Schwerpunkt lag zunächst auf GaAs basierten Heterostrukturen. Die hinzukommenden II-VI-Schichtenstrukturen erwiesen sich wegen ihrer speziellen Eigenschaften und insbesondere wegen ihrer kleinen Bandlücke als besonders interessant. Davon soll der letzte Abschnitt über neuere Würzburger Arbeiten einen Eindruck vermitteln.

Naturgemäß konnte hier nur ein relativ pauschaler Eindruck von dem angesprochenen Arbeitsgebiet vermittelt werden, hinsichtlich Einzelheiten wird auf die Originalliteratur verwiesen.

Danksagung

Frau Anja Brück - Poirier danke ich für die Hilfe bei der Herstellung des Manuskripts.

Literaturverzeichnis

- [1] G. LANDWEHR, G. & P. HANDLER: J. Phys. Chem. Solids **23**, 891 (1962)
- [2] ALTSHULER, B.L., A.G. ARONOV & P.A. LEE: Phys. Rev. **44**, 1288 (1980)
- [3] UCHIDA, S., G. LANDWEHR & E. BANGERT: Solid State Comm. **45**, 869 (1983)
- [4] LANDWEHR, G., E. BANGERT & S. UCHIDA: Solid State Electronics **28**, 171 (1985)
- [5] LANDWEHR, G. & K. AUCH: Z. f. Naturforschung **18a**, 424 (1963)
- [6] LANDWEHR, G. & P. DRATH: Z. Angew. Physik **20**, 392 (1966)
- [7] BRAUN, E. & G. LANDWEHR: Z. f. Naturforschung **21a**, 495 (1966)
- [8] BLIEK, L.M., G. LANDWEHR & M. VON ORTENBERG: Proc. Int. Conf. on the Physics of Semiconductors, Moscow, 1968, p. 710
- [9] KLITZING, K. VON & G. LANDWEHR: phys. stat. sol. (b) **45**, K112 (1971)
- [10] FOWLER, A.B., F.F. FANG, W.E. HOWARD & P.J. STILES: J. Phys. Soc. Japan **21**, Suppl. (1966) p. 331
- [11] KLITZING, K. VON, G. LANDWEHR & G. DORDA: Solid State Comm. **15**, 489 (1974)
- [12] KLITZING, K. VON, G. LANDWEHR & G. DORDA: Japan. Journ. Appl. Phys. Suppl. 2, Pt 2, 351 (1974)
- [13] BANGERT, E., K. VON KLITZING & G. DORDA: Proc. 12th Int. Conf. on the Physics of Semiconductors, Stuttgart 1974, p. 714, Teubner, Stuttgart 1974

- [14] OHKAWA, F.J. & Y. UEMURA, Progress in Theoretical Physics, Suppl. **57**, 164 (1974)
- [15] Opportunities in High Magnetic Field Science, The National Academies Press, Washington 2005
- [16] ENGLERT, TH. & K. VON KLITZING: Surface Science **13**, 70 (1978)
- [17] KLITZING, K. VON, G. DORDA & M. PEPPER: Phys. Rev. Lett. **45**, 494 (1980)
- [18] TSUI, D.C., H.L. STÖRMER & A.C. GOSSARD: Phys. Rev. Lett. **48**, 1562 (1982)
- [19] TSUI, D.C. & A.C. GOSSARD: Appl. Phys. Lett. **37**, 550 (1981)
- [20] LANDWEHR, G.: Physica **B 298**, 384 (2001)
- [21] ZHANG, X.C., A. PFEUFFER-JESCHKE, K. ORTNER, V. HOCK, H. BUHMANN, C.R. BECKER & G. LANDWEHR: Phys. Rev. B **63**, 2453 (2001)
- [22] BUHMANN, H., J. LIU, Y.S. GUI, V. DAUMER, M. KÖNIG, C.R. BECKER & L.W. MOLENKAMP: Proc. 15th Int. Conf. Appl. High Magnetic Fields, Oxford 2002 (CD, see 5.2)
- [23] LANDWEHR, G.: Physica E **1** (2003)